

## Експериментальне визначення показників теплотехнічного стану ізоtermічних вагонів в умовах функціонування

В. Є. Осьмак, В. М. Іщенко, І. І. Кульбовський, А. В. Нечипорук

Для експериментального визначення теплотехнічного стану ізоtermічних вагонів в умовах функціонування запропоновано процедуру роздільного визначення показників тепло-масообміну. Її особливість полягає в тому, що для експериментального визначення показників кондуктивної передачі теплоти та герметичності використані умови, методи та засоби теплотехнічних випробувань, які застосовуються при будівництві, експлуатації і ремонті ізоtermічних вагонів. Для роздільного визначення істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$  використані експериментальні умови теплового процесу нагрівання повітря у вантажному приміщенні кузова вагона і вимірювання об'єму витрати повітря крізь нещільності при створенні в кузові постійного стандартного надлишкового тиску 49 Па.

На підставі значень істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$  з урахуванням теплофізичних властивостей вантажу та використанням засобів MS Excel побудовані графічні залежності зміни температури вантажу в ізоtermічному вагоні на умови транспортування.

Результати дослідження пропонується використовувати для роздільного визначення показників тепло-масообміну та оцінки теплозахисних якостей огороження кузова ізоtermічних вагонів в умовах функціонування. На підставі значення істинного коефіцієнта теплопередачі та площі еквівалентного отвору фільтрації можна визначати зміни температури вантажу на умови транспортування з урахуванням перепаду температур атмосферного повітря

Ключові слова: ізоtermічний вагон, теплоізоляція, теплотехнічні випробування, тепло-масообмін, коефіцієнт теплопередачі, площа еквівалентного отвору, математична модель

### 1. Вступ

Перевезення вантажів залізничним транспортом здійснюється різними типами рухомого складу. Швидкопсувні вантажі та вантажі, що потребують захисту від атмосферного впливу і різких перепадів температур, перевозяться в ізоtermічному рухомому складі. Парк ізоtermічного рухомого складу в теперішній час структурований відповідно обсягів, номенклатури та умов перевезення вантажів і містить:

- 87,1 % – криті вагони з утепленим кузовом переобладнані з рефрижераторного рухомого складу;
- 7,7 % – вагони-термоси моделі ТН-4-201 побудови заводу «Дессау» Німеччини;
- 5,2 % – рефрижераторні 5-вагонні секції.

Обсяги перевезення вантажів в ізотермічному рухомому складі за останні 5 років складають:

- 91 % – криті вагони з утепленим кузовом переобладнані з рефрижераторного рухомого складу;
- 2,8 % вагони-термоси;
- 6,2 % – рефрижераторні 5-вагонні секції [1].

Для перевезення значних обсягів вантажів перевагу мають криті вагони з теплоізоляцією, які здатні забезпечити необхідний захист та умови зберігання при транспортуванні.

Для виготовлення і постачання на залізницю даного типу вагонів відбувається їх розробка, випробування, виробництво та дослідження, що спрямовані на подальше удосконалення теплотехнічних властивостей огороження кузова і методів оцінки їх теплозахисних якостей.

Впровадження в практику вагонного господарства нових підходів підвищення ефективності використання критих вагонів з теплоізоляцією шляхом удосконалення методів експериментального визначення параметрів теплотехнічного стану кузова в умовах експлуатації, свідчать про актуальність обраного напрямку дослідження [2].

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В роботі [3] приведені результати аналізу теплообмінних процесів, що відбуваються в рефрижераторному рухомому складі (РРС) в умовах експлуатації а також розглянуті методи теплотехнічних випробувань вагонів. Запропоновано теплотехнічні якості окремих конструкцій огороження кузова оцінювати на підставі визначення коефіцієнтів теплопередачі в локальних зонах, що дозволяє виявити дефекти в теплоізоляції кузова, при будівництві і ремонті вагонів. Але контроль теплозахисних властивостей кузова РРС за середнім коефіцієнт теплопередачі дає відносні значення герметичність кузова вагона. Все це дозволяє стверджувати, що зі збільшенням строку експлуатації вагона буде збільшуватися похибка оцінки теплозахисних якостей. Це і є основним недоліком [3] роботи.

В роботі [4] для визначення теплозахисних властивостей використовуються данні о температурі повітря в середині і зовні кузова вагона. Метод передбачає накопичення результатів випробування з подальшим диференціюванням. Диференціювання відбувається після того, як температура зовнішнього і внутрішньої поверхні кузова вагона порівнюються. Недоліком в роботі [4] це його велика трудомісткість процесу отримання даних. Але це в умовах вагоноремонтного підприємства майже неможливо реалізувати. Отримання необхідних даних відбувається в стаціонарному режимі роботи теплозахисного шару, отже час випробування дуже великий.

В роботі [5] розроблений метод для визначення теплозахисних властивостей теплоізоляції в будівельних конструкціях. Метод полягає у двох чергах вимірювань температур поверхонь в середині приміщення і зовні. Вимірювання проходять на протязі 24 годин. Із співставлення першої і другої черги вимірювання і визначається термічний опір теплоізоляції. Основний недолік цього ме-

тоду [5] полягає в необхідності масштабування поверхні, яку досліджують під час випробування.

В роботі [6] запропоновано визначати приведений коефіцієнт теплопередачі ІВ. Визначення коефіцієнта полягає у нагріванні повітря в середині кузова вагона до заданої температури. При цьому реєструється температура повітря в середині і ззовні вагона. Нагрівання відбувається до встановлення стаціонарного режиму, після чого зменшується майже до нуля джерело енергії. І під час охолодження вимірюють температури. Цей метод [6] направлений на зменшення часу випробування. Але виникають труднощі, які полягають в визначенні локальних коефіцієнтів теплопередачі кузова вагона.

В роботі [7] до теплотехнічних характеристик кузова вагона, поряд з коефіцієнтом теплопередачі, відносять і коефіцієнт герметичності. Методика оцінки герметичності заснована на стабілізації інфільтруемого повітря, що надходить під впливом різниці парціального тиску в середині і зовні кузова. Коефіцієнт герметичності показує, яка кількість інфільтруемого повітря припадає на  $1 \text{ м}^3$  дослідного приміщення за одиницю часу при перепаді температур в  $1^\circ\text{C}$ . Недоліком цього методу є те, що він враховує відносну вологість повітря. А значить, коефіцієнт герметичності на одному вагоні при випробуванні в літній і зимовий періоди буде різним. Це вносить незначну похибку у визначення зведеного коефіцієнту теплопередачі.

В статті [8] визначений напрямок ідеалізації вагонів за рахунок покращення процедури проведення випробувань. При цьому відзначено, що покращувати процедуру випробувань необхідно шляхом зменшення витрат та часу на її проведення. Проте в цій роботі не деталізовано особливості реалізації такого напрямку для випробувань теплотехнічних властивостей вагонів.

В роботі [9] наведені перспективні напрямки проектування кузовних елементів вагонів. В тому числі зазначено необхідність їх адаптації для перевезення спеціалізованих вантажів, які потребують особливого температурного режиму. Однак питанням експериментальної перевірки забезпечення відповідного режиму не приділено достатньої уваги.

В роботі [10] приведена оцінка теплотехнічних вимог до огороження кузова та теплоізоляційних матеріалів, що використовуються у вагонобудуванні. Розглянуті методи випробувань з визначення показників тепло-масообміну кузова вагона та відмічено, що для суттєвого поліпшення теплозахисних якостей ІВ при капітальному ремонті слід приділяти особливу увагу встановленню щільності кузова вагона. На підставі оброблення експериментальних даних встановлено пропорційну залежність між витратами повітря крізь нещільності та приведеним коефіцієнтом теплопередачі кузова вагона, ця залежність з роками набуває індивідуальних ознак для кожного вагону. Запропоновано у якості показника герметичності використовувати коефіцієнт герметичності. Цей показник є якісним і придатний лише для порівняння однотипних конструкцій і не містить кількісних характеристик.

Експериментальні дослідження приведені в роботі [11]. На підставі аналізу методів експериментального контролю теплозахисних якостей кузова вагона надані пропозиції раціонального їх застосування під час експлуатації ІРС. Осо-

бливу увагу приділено пошуку нових критеріїв оцінки якості огороження кузова вагона в частині інфільтрації повітря. Підкреслено, що в умовах ремонтних підприємств важко забезпечити отримання найбільш інформативних показників тепло-масообміну за результатами теплотехнічних випробувань.

На основі цієї інформації можливо зробити узагальнення, що існує в теперішній час велика кількість методів для визначення теплотехнічних характеристик ІВ, які базуються на рівнянні теплового балансу, і розрізняються лише способом отримання первинної інформації.

Частина дослідження може бути вирішена з впровадження в практику вагонного господарства нових підходів до експериментального визначення показників тепло-масообміну кузова вагона. Істинний коефіцієнт теплопередачі  $\bar{K}$  та площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$ , є найбільш інформативними показниками теплопередачі, які не залежать від строку експлуатації, і умов в яких відбувається випробування.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є розробка процедури експериментального визначення параметрів теплотехнічного стану критих вагонів з теплоізоляцією та підвищення ефективності їх використання в експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз показників експлуатаційної роботи, обсягів та умов перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу та різких перепадів температур навколишнього середовища;
- розробити процедуру для роздільного визначення показників тепло-масообміну огороження кузова вагона, істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  та площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$ , за результатами теплотехнічних випробувань;
- проведення експериментальних досліджень з визначення істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  та площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$ .

### **4. Теоретичний аналіз особливостей експлуатації вагонів з теплоізоляцією**

В сучасних умовах ринкової економіки з'явилась велика кількість відправників та споживачів з невеликими об'ємами перевезень. Умови перевезення значної частини цих вантажів не вимагають при транспортуванні підтримання встановленого температурного режиму, а потребує лише захисту від атмосферного впливу та різких перепадів температур навколишнього середовища. Використання для перевезення даних вантажів 5-вагонної рефрижераторної секції не ефективно – необхідно чекати, коли з'явиться необхідна загальна кількість вантажу, що перевозиться з охолодженням, опалюванням, вентиляцією або термосом. В цьому випадку, за думкою спеціалістів та науковців, перевагу мають одиночні ізотермічні вагони, які здатні забезпечити сучасні вимоги до умов зберігання більшої частини вантажів, що перевозяться залізницею. До таких ізотермічних вагонів належать криті вагони з теплоізоляцією (КВТ). Сучасний парк КВТ складається з вагонів-термосів, вагонів з утепленим кузовом переобладнанні з рефрижераторних вагонів. Також відбувається розробка, випробу-

вання та виробництво сучасних типів КВТ, продовжуються дослідження з подальшим удосконаленням властивостей теплоізоляційного огороження кузова і методів експериментальної оцінки їх теплотехнічних якостей.

Завдяки існуючим теоретичним та експериментальним розробкам є можливість комплексного дослідження процесів тепло-масообміна крізь огороження кузова при перевезенні вантажів, а також при проведенні теплотехнічних випробувань. Це дозволяє отримати достатньо загальну інформацію про теплотехнічний стан ІВ та рівень основних експлуатаційних факторів впливу на теплозахисні властивості огороження кузова [12].

Однак відомі розробки не розглядають можливість роздільного визначення показників передачі теплоти кондукцією та повітрообміном крізь отвори фільтрації огороження кузова вагона. Оскільки використання виключно розрахункових підходів значно ускладнено і досить велика розбіжність розрахункових та фактичних значень отриманих експериментально при випробуваннях. Для роздільного визначення показників тепло-масообміну необхідно мати данні теплотехнічних випробувань та розробити процедуру для розрахунку їх значення.

Роздільне визначення показників передачі теплоти кондукцією і герметичності дають можливість більш ретельно дослідити вплив експлуатаційних факторів на теплотехнічні характеристики огороження кузова вагона. Можна виділити дві групи основних факторів впливу: постійно діючі, незалежно від терміну експлуатації, та не постійно діючі – пов'язані з терміном експлуатації вагона від побудови або капітального ремонту.

До першої групи відносяться: середня температура ізоляції, швидкість руху поїзда інтенсивність сонячної радіації. В цьому випадку деякі погіршення теплозахисних якостей в експлуатаційний період пов'язані тільки з інтенсифікацією тепловіддачі на зовнішніх поверхнях кузова. Більш суттєве пониження цих якостей проглядається під впливом факторів другої групи: зволоження, старіння та просідання ізоляції, а також погіршення щільності кузова, пов'язаних зі збільшенням терміну експлуатації.

В дослідженні це досягається шляхом удосконалення методів експериментального визначення параметрів теплотехнічного стану ІВ та запропонованих теплотехнічних розрахунків з роздільного визначення показників тепло-масообміну.

Нормативи, які регламентують експлуатаційно-технічні показники ІРС залізниці під час перевезення вантажів, встановлюють, що одним з ключових показників, який характеризує в цілому теплотехнічні властивості кузова ІВ, є загальний коефіцієнт теплопередачі –  $K_{pr}$ . На залізницях діє система технічного обслуговування та ремонту вагонів, яка базується на застосуванні комбінованого критерію при направленні вагонів в плановий ремонт, що складається з критерію календарної тривалості (в роках) і критерію фактичного виконання об'єму робіт (тис. км. пробігу).

При існуючій системі технічного обслуговування та ремонту функціонування КВТ можливо описати випадковим процесом  $x(\tau)$ , що характеризує його стан  $S_i$  в довільний момент часу  $\tau$  та приймає наступне значення, приведені на рис. 1.

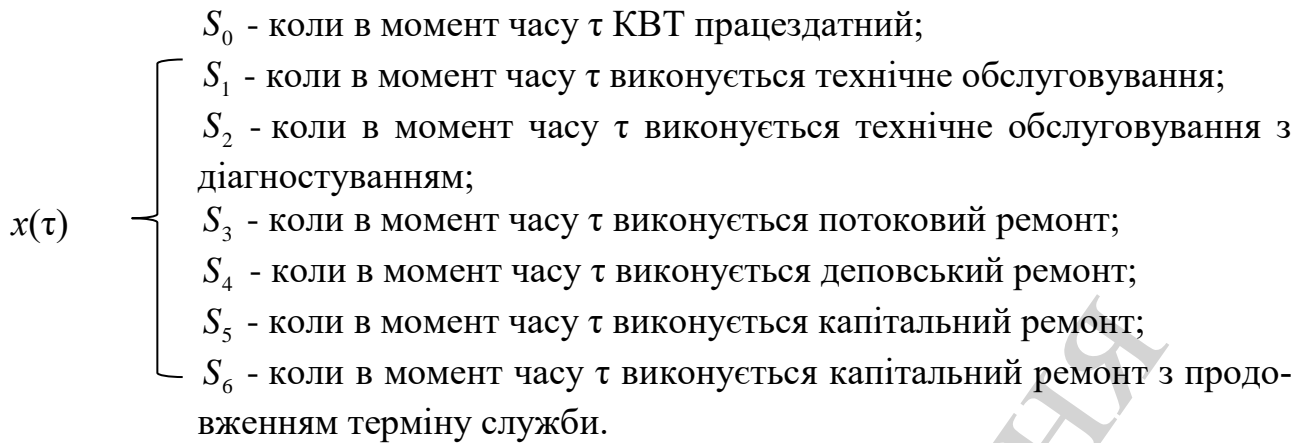


Рис. 1. Існуюча система технічного обслуговування та ремонту КВТ

Можливі переходи процесів  $x(\tau)$  при функціонуванні КВТ приведені на рис. 2.

Аналіз функціонування КВТ з урахуванням діючої структури технічного обслуговування та ремонту з видом та характером відновлювальних робіт показав, що в процесі експлуатації теплотехнічні випробування з визначення загального коефіцієнту теплопередачі огороження кузова виконуються тільки при капітальних ремонтах, визначення герметичності кузова при деповському та капітальних ремонтах і значення цих показників не відображається в технічному паспорті вагона.

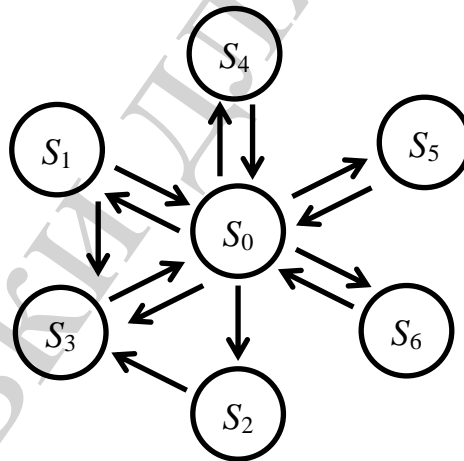


Рис. 2. Діаграма переходу процесу  $x(\tau)$  при функціонуванні КВТ

Стан КВТ  $S_0$  забезпечується правильною організацією експлуатації і проведення технічного обслуговування [13].

Перехід КВТ зі стану  $S_0 - S_2 - S_3 - S_0$  забезпечується виконанням технічного обслуговування з діагностуванням та проведенням поточного ремонту.

При технічному діагностуванні визначається дійсна потреба в тій чи іншій операції технічного обслуговування. При виявленні несправності здійснюється перехід зі стану  $S_2$  в стан  $S_3$  для виконання поточного відчіпного ремонту.

Перехід КВТ зі стану  $S_0 - S_4 - S_0$ ,  $S_0 - S_5 - S_0$ ,  $S_0 - S_6 - S_0$  забезпечується проведенням ремонтних робіт на ремонтних підприємствах. Перебіг процесу  $x(\tau)$  залежить від фактично виконаного об'єму робіт після побудови або капітального ремонту. Процес  $x(\tau)$  в даному випадку переходить зі стану  $S_0 - S_5 - S_0$ ,  $S_0 - S_6 - S_0$ , враховуючи, що при капітальному ремонті всі елементи конструкції КВТ повністю відновлені.

## 5. Теоретичні процеси тепло – масообміну крізь огороження кузова вагона з теплоізоляцією

Розробка розрахункової схеми для дослідження показників тепло-масообміну крізь огороження кузова вагона базувалась на фізичній сутності процесу. Математична модель визначає теплотехнічні показники в реальному тепловому процесі при теплотехнічних випробуваннях.

Також розглянуто розрахункова схема та фізична сутність математичної моделі теплотехнічного стану КВТ на умови транспортування вантажу, яка базується на показниках  $\bar{K}$  і  $F_{ek}$ .

В дослідженні розглянуто класичну конструкцію КВТ, в якій з використанням методів ієрархічності та декомпозиції (блочності), теплотехнічні характеристики огороження кузова визначаються за показниками тепло-масообміну груп суцільної ізоляції, теплових містків та ущільнення. Формулювання задачі аналізу теплозахисних властивостей конструкції огороження кузова базується на узагальненому рівнянні теплопередачі для стаціонарних умов теплообміну у вигляді теплового балансу

$$Q = K \cdot S(\theta_z - \theta_{\kappa}), \quad (1)$$

де  $Q$  – тепловий потік крізь огороження кузова вагона, Вт;  $K$  – загальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>К;  $S$  – середня площа поверхні кузова, м<sup>2</sup>;  $\theta_z$  – температура зовнішнього повітря, К;  $\theta_{\kappa}$  – температура в середині вагона, К.

Кузов вагона з теплоізоляцією в теплотехнічному відношенні уявляє собою досить складну просторову систему. Наявність багаточисленних металевих елементів досить складної геометричної форми в огороженні кузова роблять практично неможливими точне розрахункове визначення коефіцієнта теплопередачі кузова. Теплопередача крізь огороження кузова вагона супроводжується процесами неорганізованого природного повітрообміну за рахунок нещільностей. Ці процеси викликають додаткові теплонадходження (тепловтрати) і погіршують теплозахисні властивості кузова.

Тому можливо стверджувати лише про методи, що дають найбільш наближені розрахункові і істинні середні теплотехнічні характеристики кузова вагона.

В зв'язку з цим представляється доцільним використовувати такі методи контролю, котрі дозволяли би оцінити теплотехнічні показники кузова вагона шляхом випробувань і теплотехнічних розрахунків. Найбільш інформативними показниками теплотехнічних якостей ІВ являється істинний коефіцієнт тепло-

передачі  $\bar{K}$  і площа еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$ . Визначати їх значення в реальному тепловому процесі пропонується за результатами теплотехнічних випробувань з визначення приведенного коефіцієнта теплопередачі методом внутрішнього нагріву з виходом на рівноважний тепловий режим і показника герметичності, шляхом виміру об'єму повітря, що виходить крізь нещільності при створенні в кузові вагона постійного надлишкового тиску.

Визначаючи істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$  використані данні отримані під час експерименту теплового процесу. Експеримент полягає в нагрівання повітря у вантажному приміщенні кузова вагона і вимірювання об'єму витрати повітря крізь нещільності при створенні в кузові постійного стандартного надлишкового тиску 49Па. На умови нормативних документів теплотехнічних випробувань розроблена математична модель та процедура з роздільного визначення показників тепломасообіну істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$  теплоізовованого огороження кузова вагона [14].

Схема взаємодії окремих елементів теплотехнічної системи між собою та з навколишнім середовищем наведена на рис. 3.

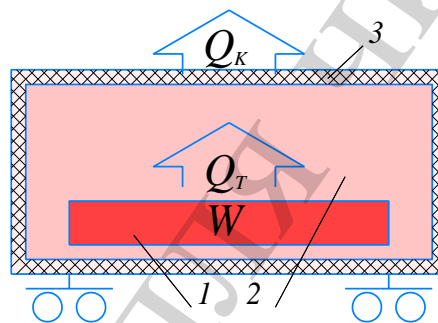


Рис. 3. Схема взаємодії окремих елементів теплотехнічної системи вагона при випробуваннях: 1 – електропечі; 2 – вантажне приміщення вагона; 3 – огороження кузова;  $W$  – витрати електроенергії, Вт·год;  $Q_T$  – тепловий потік теплоносія, Вт;  $Q_K$  – тепловий потік крізь огороження кузова в навколишнє середовище, Вт

На підставі складеної схеми взаємодії окремих елементів теплотехнічної системи при випробуваннях «вантажне приміщення – джерело теплоти – теплоносії – огороження кузова – навколишнє середовище», розроблена математична модель та процедура роздільного визначення показників тепломасообіну. Математична модель включає систему балансових рівнянь характеристики теплотехнічної системи, систему обмежень та показники тепломасообіну.

Система балансових рівнянь містить:

а) Рівняння теплового балансу системи



$$\begin{cases} W_{ne} = K_{pr} \cdot S(\theta_v - \theta_z), \\ p_v = (m - m_f) R(\theta_v - \theta_z), \\ W_{ne} = Q - Q_f, \end{cases} \quad (2)$$

де  $W_{ne}$  – потужність нагрівальних пристроїв, Вт;  $p$  – абсолютний тиск повітря, Па;  $v$  – об’єм вантажного приміщення,  $m^3$ ;  $m$  – маса повітря у вантажному приміщенні кузова ІВ на початку нагрівання, кг;  $m_f$  – маса втрат повітря крізь отвори фільтрації під час нагрівання, кг;  $Q_f$  – тепловий потік фільтрації повітря, Вт.

б) Рівняння теплового потоку крізь огороження кузова за рахунок кондуктивної передачі теплоти

$$\begin{cases} Q = \bar{K} \cdot S(\theta_v - \theta_z), \\ \bar{K} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n K_i \cdot S_i, \\ K_i = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_\lambda}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $R_a$  – термічний опір конвекції,  $m^2K/Вт$ ;  $R_\lambda$  – термічний опір кондукції,  $m^2K/Вт$ .

в) Рівняння теплового потоку від фільтрації повітря крізь нещільності кузова

$$\begin{cases} Q_f = L_f \cdot \rho_v(h_v - h_z), \\ L_f = F_{ek} \cdot \omega, \\ \omega = \sqrt{2(h_v - h_z)}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $L_f$  – об’ємні витрати повітря крізь отвори фільтрації,  $m^3/с$ ;  $\rho_v$  – щільність повітря,  $кг/м^3$ ;  $h_v$  – ентальпія внутрішнього повітря кузова, Дж/кг;  $h_z$  – ентальпія повітря зовні кузова, Дж/кг;  $\omega$  – швидкість руху повітря крізь отвори фільтрації, м/с.

д) Рівняння витрат повітря крізь отвори фільтрації при випробуваннях кузова на герметичність при створенні в кузові постійного стандартного надлишкового тиску

$$\begin{cases} L_{ct} = \omega_{ct} \cdot F_{ek}, \\ \omega_{ct} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \\ F_{ek} = \frac{L_{ct}}{\omega_{ct}}, \end{cases} \quad (5)$$

де  $L_{ct}$  – об’ємні витрати повітря крізь отвори фільтрації, при надлишковому тиску  $\Delta p$ , м<sup>3</sup>/с;  $\omega_{ct}$  – швидкість повітря крізь отвори фільтрації, під час надлишкового тиску  $\Delta p$ , м/с;  $F_{ek}$  – площа еквівалентного отвору фільтрації в огороженні кузова, м<sup>2</sup>;  $\Delta p$  – стандартний надлишковий тиск у вантажному приміщенні кузова, Па;  $\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Тепло-масові і конструктивні параметри змінюються тільки в межах можливих та технічно здійснюючих станів енергоносіїв і конструкції, а також в межах технічно можливих початкових та експлуатаційних станів матеріалів в елементах системи. Ці обмеження відображені у вигляді нерівностей сукупності параметрів [15]

$\theta_B^* \leq \theta_B \leq \theta_B^{**}$ ,  $\bar{K}^* \leq \bar{K} \leq \bar{K}^{**}$ ,  $F_{ek}^* \leq F_{ek} \leq F_{ek}^{**}$ . (однією та двома зірками в індексі відображені мінімальні та максимальні значення параметрів відповідно).

У якості показників тепло-масообміну теплотехнічної системи приймається істинний коефіцієнт теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$

Для роздільного визначення показників тепло-масообміну істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$  розроблена процедура, яка зображена на рис. 4.

Також формулювання задачі дослідження раціонального використання КВТ відповідно теплозахисних властивостей огороження кузова доповнено узагальненою математичною моделлю системи «навколишнє середовище – кузов вагона – вантаж» (НС – ВПВ – В). За прийнятою аналогією поділу теплотехнічної системи на окремі елементи. Найвищим рівнем є розв’язок в цілому за теплотехнічною системою (НС – ВПВ – В). Наступні рівні – огороження кузова і вантажу, за котрими в теперішній час накопичено достатня кількість конкретних рішень.

Структура теплотехнічної системи (НС – ВПВ – В) зображена на рис. 5.

Вирішуючи різноманітні задачі пов’язані з експлуатацією ІВ, насамперед виникають питання, пов’язані зі зміною температури вантажу у вантажному приміщенні вагона за рахунок кількості теплоти, що надходить у вагон в літній період, і кількості теплоти, що втрачається у зимовий період.

Критеріями ефективності даної системи буде слугувати:

- площа поверхні теплопередачі кузова вагона,  $H$ , м<sup>2</sup>;
- істинний коефіцієнт теплопередачі огороження кузова,  $\bar{K}$ , Вт/м<sup>2</sup>К;
- площа еквівалентного отвору фільтрації,  $F_{ek}$ , м<sup>2</sup>;
- тепловий еквівалент вантажу,  $W_{em}$ , Дж/К;

- температура навколишнього середовища,  $\theta_3$ , К;
- температура вантажу,  $\theta_в$ , К.

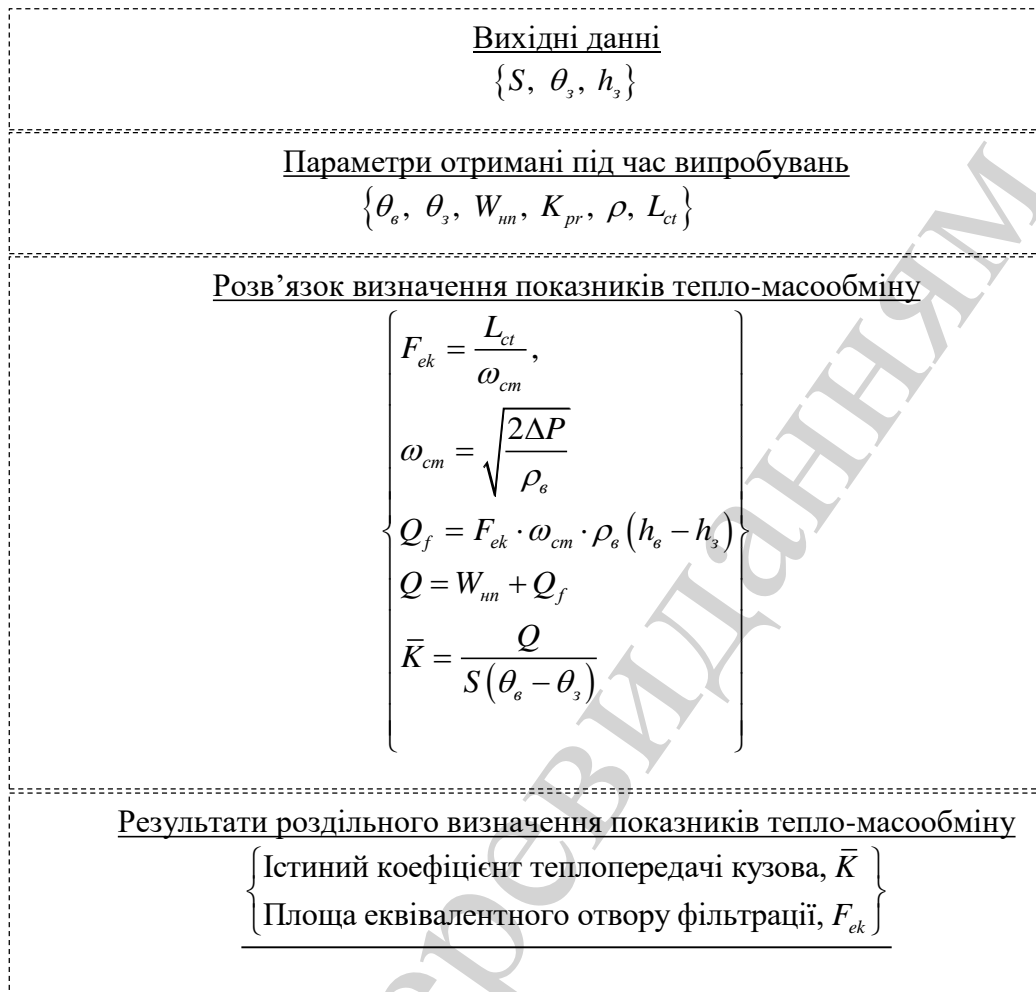


Рис. 4. Процедура роздільного визначення показника тепло-масообміну під час теплотехнічних випробуваннях ІВ

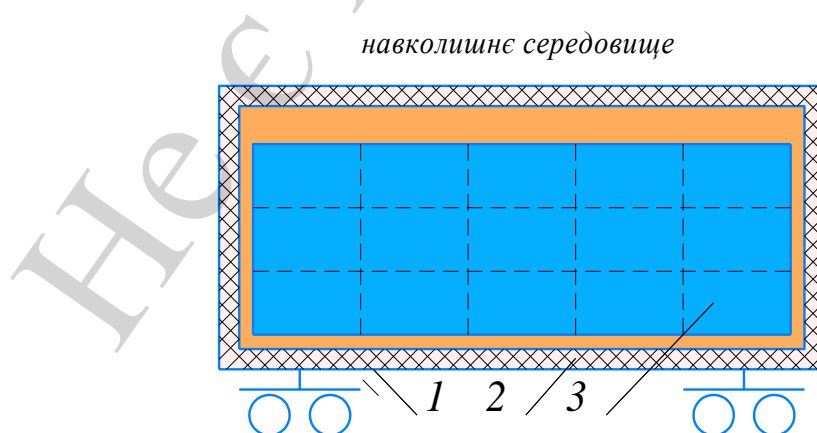


Рис. 5. Структура теплотехнічної системи «навколишнє середовище – вантажне приміщення вагона – вантаж»: 1 – огороження кузова; 2 – теплоізоляція; 3 – вантаж

В якості основного математичного описання структури системи використовуємо рівняння теплового балансу

$$Q_{\text{сум}} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (6)$$

де  $Q_{\text{сум}}$  – сумарна кількість теплоти, Вт;  $Q_1$  – кількість теплоти, що передається кондукцією крізь огородження кузова в наслідок наявності різниці температур зовнішнього повітря і повітря в середині вантажного приміщення, Вт;  $Q_2$  – кількість теплоти, що проникає у вантажне приміщення вагона у наслідок повітрообміну крізь нещільності вантажного приміщення, Вт;  $Q_3$  – кількість теплоти, що поглинається зовнішньою поверхньою огородження від дії сонячної радіації, Вт.

Складаємо систему балансових рівнянь елементів системи

$$\begin{cases} Q_1 = \bar{K} \cdot S \cdot (\theta_z - \theta_e) \\ Q_2 = F_{\text{ек}} \cdot \rho \cdot C (\theta_z - \theta_e) \cdot \sqrt{2C \cdot (\theta_z - \theta_e)}, \\ Q_3 = \bar{K} \cdot S \cdot \Delta\theta_{\text{ек}} \end{cases} \quad (7)$$

де  $\bar{K}$  – істинний коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $S$  – площа поверхні огородження кузова вагона, м<sup>2</sup>;  $\theta_z$  – зовнішня температура повітря, К;  $\theta_e$  – температура повітря в середині приміщення, К;  $F_{\text{ек}}$  – площа еквівалентного отвору фільтрації, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – теплоємність повітря, Дж/кг·К;  $\Delta\theta_{\text{ек}}$  – умовне еквівалентне підвищення температури зовнішнього повітря за рахунок дії сонячної радіації, град [18].

Сумарна кількість теплоти, що потрапляє у вантажне приміщення вагона, залежить від значення наступних параметрів

$$Q = f(\bar{K}, S, F_{\text{ек}}, C, \rho, \Delta\theta_{\text{ек}}, \theta_z, \theta_e), \quad (8)$$

де  $C$  – теплоємність повітря, Дж/кг К;  $\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta\theta_{\text{ек}}$  – умовне еквівалентне підвищення температури зовнішнього повітря за рахунок дії сонячної радіації, град.

Зміна температури вантажу, що перевозиться у вантажному приміщенні вагона, зі зміною температури атмосферного повітря визначається залежністю [15]

$$Q_{\text{сум}} = W_{\text{вт}} \cdot \Delta t \cdot \tau^{-1}, \quad (9)$$

де  $W_{\text{вт}}$  – тепловий еквівалент вантажу, Дж/кг;  $\Delta t$  – зміна температури вантажу, К;  $\tau$  – тривалість дії кількості теплоти, с.

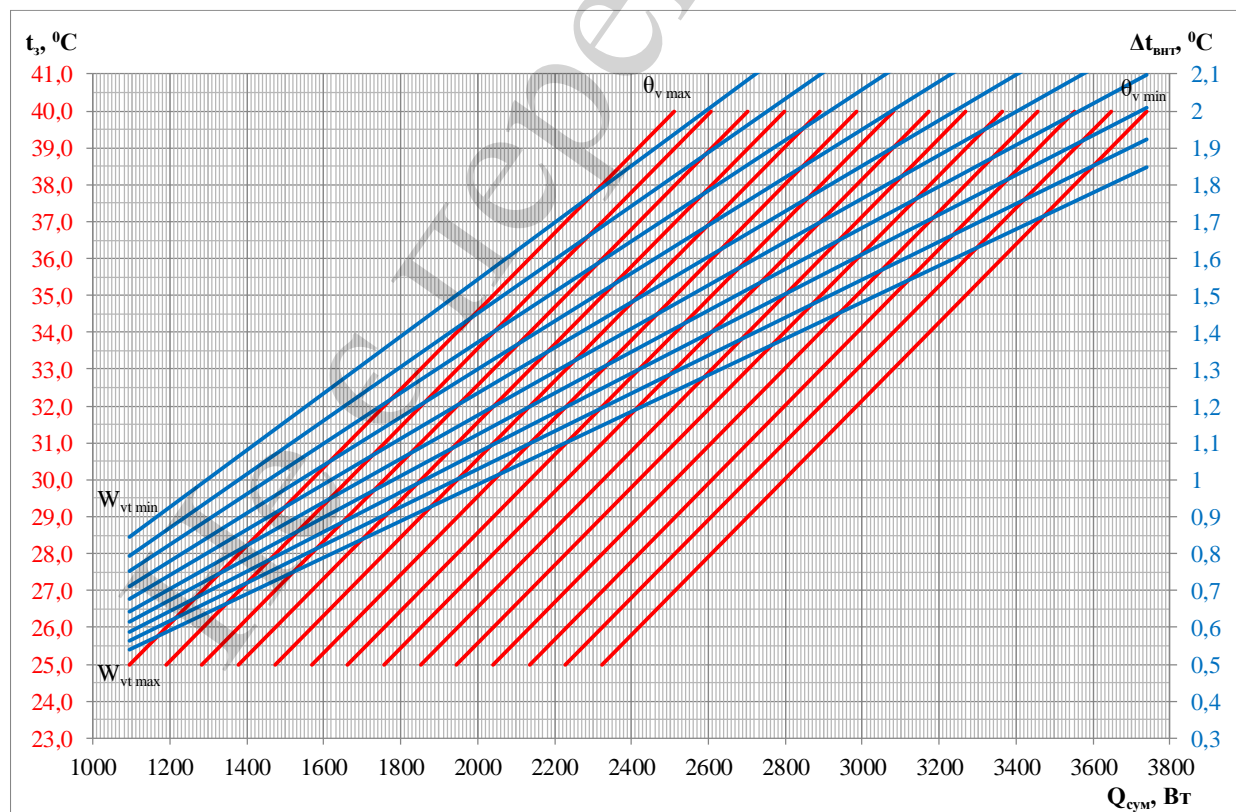
Обмеження відображені у вигляді нерівностей сукупності параметрів

$$\theta_3^{\min} \leq \theta_3 \leq \theta_3^{\max}, W_{\text{BT}}^{\min} \leq W_{\text{BT}} \leq W_{\text{BT}}^{\max}, \Delta t^{\min} \leq \Delta t \leq \Delta t^{\max}.$$

Для випадку перевезення вантажу в зимовий період кількість теплоти, що втрачається з вагона, визначається дією процесів теплопередачі крізь огороження кузова внаслідок наявності різниці температур повітря всередині вантажного приміщення вагона і зовнішнього повітря та повітрообміном крізь нещільності кузова. Для визначення сумарної кількості теплоти, що втрачається із вагона в зимовий період, використовуємо рівняння щодо визначення кількості теплоти, яка проникає у вантажне приміщення в літній період з врахуванням зміни напрямлення потоку теплоти. Використовуючи вище наведені формули та за допомогою програмного комплексу MS Excel побудовані графічні залежності, які зображені на рис. 6.

При побудові цих графіків були використані значення  $\bar{K}$  і  $F_{ek}$ , отримані експериментальним шляхом для вагона моделі 11-1807-04. Тепловий еквівалент отриманий відповідно до номенклатури вантажів, що дозволено перевозити зазначеним вище транспортним засобом.

Мінімальне і максимальне значення теплового еквіваленту вантажу, що перевозиться, визначається в залежності від його теплофізичних властивостей. Перепад температур зовнішнього повітря відповідав діапазону від мінус 40 °С до плюс 40 °С. Застосовуючи вище наведені формули та засоби MS Excel можливо побудувати графічні залежності зміни температури будь якого вантажу на умови транспортування в ізотермічних вагонах.



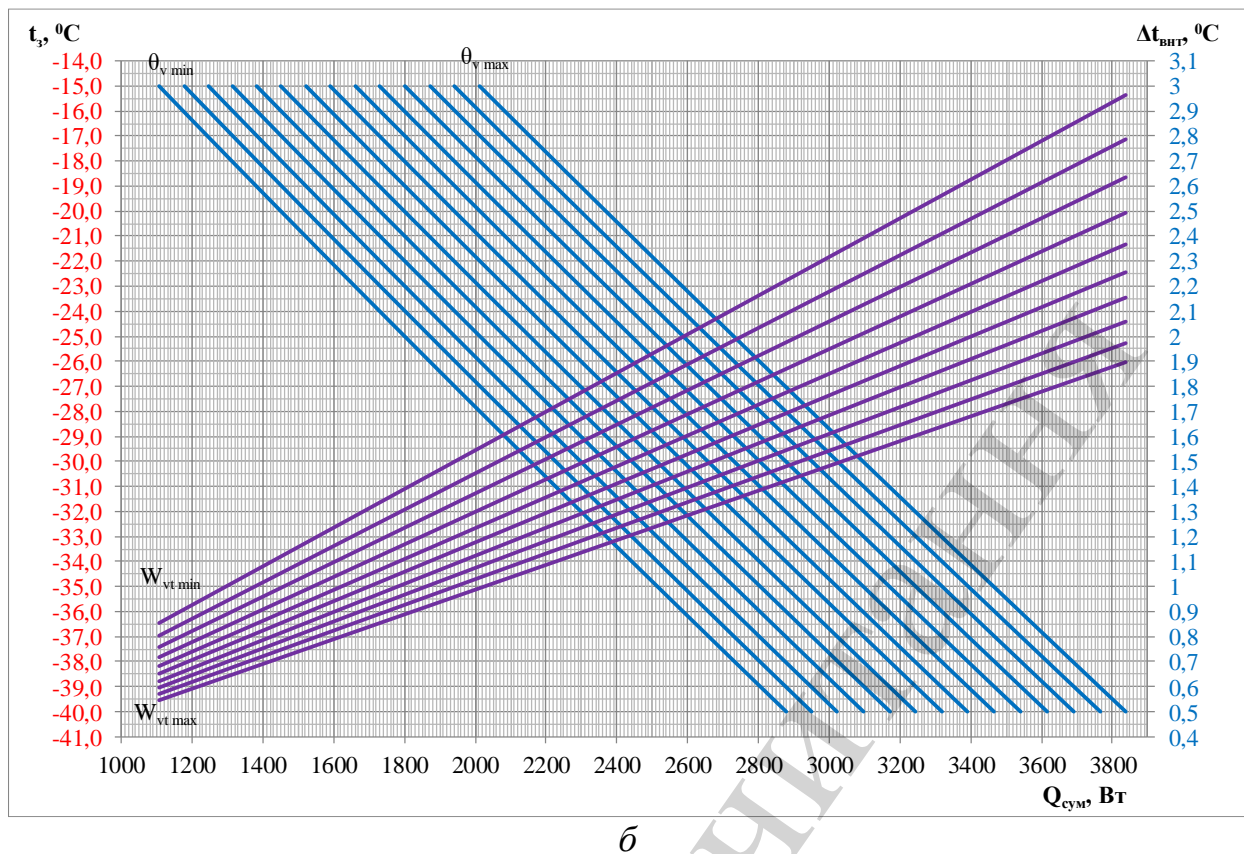


Рис. 6. Бінарні залежності зміни температури вантажу при перевезенні в КВТ:  
 $a$  – у літній період;  $b$  – у зимовий період

## 6. Експериментальна оцінка відповідності розробленої математичної моделі та теоретичних досліджень

Експеримент проходив на натурному дослідному зразку 4-вісного критого вагона з теплоізоляцією моделі 11-1807-04 (рис. 7), який призначений для перевезення продовольчих швидкопсувних та не швидкопсувних вантажів, які термічно підготовлені до завантаження. Для теплозахисту стін, даху та підлоги використовується теплозахисний матеріал – пінополіуретан, що захищений від пошкоджень металевими облицювальними листами. Основні технічні характеристики вагона приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики вагона мод. 11-1807-04

Найменування показника (параметр, розмір), одиниці виміру	Значення показника (параметра, розміру)
Вантажопідйомність, т	58
Об'єм кузова, м <sup>3</sup>	145
Довжина кузова всередині, мм	18360
Ширина кузова всередині, мм	2750
Висота кузова всередині, мм	2550
Площа даху, м <sup>2</sup>	68,73
Розміри дверного отвору в світлі, мм	2294×2850



Рис. 7. Дослідний зразок критого вагона з теплоізоляцією моделі 11–1807–04 виробництва заводу ОАО «Азовобщемаш» (Україна)

Випробування проводились в спеціалізованому приміщенні. Основною задачею теплотехнічних випробувань було визначення значення приведенного коефіцієнта теплопередачі  $K_{pr}$  та показника герметичності  $L_{ct}$ . Значення приведенного коефіцієнта теплопередачі огороження кузова  $K_{pr}$  визначалось методом нагрівання повітря у вантажному приміщенні вагона. Показник герметичності  $L_{ct}$  визначався витратами повітря при створенні стандартного надлишкового тиску.

При проведенні теплотехнічних випробувань контролюються наступні параметри:

- температура всередині вантажного приміщення;
- температура зовні вантажного приміщення вагона;
- час нагрівання вантажного приміщення;
- витрата електроенергії.

При проведенні випробування на герметичність контролюються наступні параметри:

- показання тягонапоміра;
- витрати повітря;
- час випробування.

В результаті проведених теплотехнічних випробувань отримане значення приведенного коефіцієнта теплопередачі огороження кузова вагона, яке складає  $K_{pr}=0,259$  Вт/м<sup>2</sup>К. Дані, що отримані при випробуванні, наведені в табл. 2.

В результаті проведених випробувань на герметичність отриманий показник герметичності кузова вагона, який визначається витратами повітря крізь нещільності кузова і складає  $L_{ct}=51,71$  м<sup>3</sup>/год, при стандартному надлишковому тиску в 49 Па.

Дані, що отримані під час випробувань, наведені в табл. 3.

За результатами теплотехнічних випробувань вагона моделі 11 1807 04 для визначення показників передачі теплоти кондукцією  $\bar{K}$  і герметичності  $F_{ek}$  огороження кузова використано процедуру, що розроблена (рис. 3).



Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень критого вагона з теплоізоляцією моделі 11-1807-04 при теплотехнічних випробуваннях

Номер виміру	Час виміру, год.	Середнє значення ( $t_{\text{ср}}^3$ , °C) вимірів	Середнє значення ( $t_{\text{ср}}^{\text{ВН}}$ , °C) вимірів	Показання лічильника, Вт
1	23:00	5,55	51,875	222,30
2	00:00	5,55	51,842	224,95
...	...	...	...	...
11	10:00	5,05	51,483	251,20
12	11:00	5,05	51,475	253,85

Таблиця 3

Результати випробування вагона на герметичність

Номер виміру	Показник тягонапороміра ТНМП-52, Па	Час виміру, хв.	Показники газового лічильника, м <sup>3</sup>		Кількість повітря за час випробування, м <sup>3</sup>	Витрати повітря, м <sup>3</sup> /год
			початк.	кінц.		
1	49	6	691,25	696,43	5,18	51,8
2	49	10	691,25	699,85	8,6	51,6
3	49	30	691,25	717,12	25,87	51,74
Середнє значення						51,71

Нормативне значення показника передачі теплоти кондукцією  $\bar{K}$ , що встановлене при проектуванні вагона і визначеного за результатами випробування та розробленою процедурою, збігаються з похибкою 5,6 %. Проведений порівняльний аналіз отриманих даних свідчить про достатню достовірність проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

## 7. Обговорення шляхів підвищення ефективності використання критих вагонів з теплоізоляцією в експлуатації

Існуючі на теперішній час показники експлуатаційної роботи свідчать, що КВТ є самою багаточисельною складовою ізотермічного рухомого складу (ІРС). Чисельність КВТ в загальному парку ІВ складає 87,1 %. Обсяги перевезень в КВТ досягає 91 % від загальних об'ємів перевезень вантажів ІРС.

Особливо в умовах коли змінюється номенклатура, способи та об'єми перевезення вантажів. Даний тип вагонів, на відміну від вагонів рефрижераторів, не має холодильно-опалювальної установки, що підтримує температурний режим перевезення вантажу на шляху прямування.

Підтримання температурного режиму вимагає спеціального огороження вантажного приміщення вагона. Вирішальна роль в цьому випадку належить тепловій ізоляції. Шар теплоізоляції має великий термічний опір, який різко зменшує зовнішні теплонадходження та дає можливість тривалий час підтримувати в вагоні необхідні температурно-вологісні умови. Достатньо розвинута по товщині та



об'єму теплова ізоляція перешкоджає повітрообміну з навколишнім середовищем, що також зменшує тепло надходження у вантажне приміщення вагона.

Важливу роль в забезпеченні ефективного використання вагонів відіграє якісна і ефективна оцінка їх теплотехнічних показників в умовах експлуатації. В теперішній час можливо говорити про ці або інші теплотехнічні показники ІВ тільки на початковій стадії експлуатації після випуску з заводу – виробника. Це пояснюється тим, що новий рухомий склад підлягає ретельним випробуванням та дослідженням з визначення основних показників та характеристик, до яких належать: вантажопід'ємність, коефіцієнт тари, осьове навантаження, маса «брутто», місткість вагона, середній коефіцієнт теплопередачі, показник герметичності.

Але вже після двох-трьох років експлуатації вагона неможливо достатньо впевнено стверджувати про його показники і характеристики та теплозахисні властивості огороження кузова вагона. Ця задача ще більш ускладнюється після проходження деповського або капітального ремонтів. Це видно з раніше наведеної системи технічного обслуговування.

Існуючі ІВ мають технічні паспорти, де відображено в основному загальні вихідні данні о параметрах серійного вагона і відсутні показники, які визначають теплотехнічні властивості огороження кузова та теплоізоляції. Пропонуємо, що технічний паспорт вагона повинен містити данні, за якими в будь який час експлуатації можливо дізнатися про його теплотехнічні властивості, рівень обмеження придатності, ступень надійності теплоізоляції, якість виробництва, ремонту і експлуатації. На організаційному рівні доцільно в існуючу структуру технічного паспорта критого вагона з теплоізоляцією занести характеристики, що відображають теплозахисні властивості огороження кузова.

Для заново збудованих вагонів в технічний паспорт можливо занести наступні теплотехнічні характеристики:

- приведений коефіцієнт теплопередачі ( $K_{pr}$ ), що характеризує сумарний тепло-масообмін вантажу і повітря у вантажному приміщенні вагона з навколишнім середовищем;

- показник герметичності – об'ємні витрати повітря при створенні у кузові вагона нормованого надлишкового тиску 49 Па ( $V_{ct}$ ).

Для вагонів, що пройшли капітальний ремонт, занести в технічний паспорт додатково:

- істинний (переважно кондуктивний) коефіцієнт теплопередачі огороження кузова вагона ( $\bar{K}$ );

- площу еквівалентного отвору фільтрації ( $F_{ек}$ ), яка є геометричним показником герметичності.

Для встановлення значень  $\bar{K}$  та  $F_{ек}$  пропонується використовувати розроблену в дослідженні процедуру роздільного визначення показників тепло-масообміну за результатами теплотехнічних випробувань методом нагрівання повітря у вантажному приміщенні і об'ємні витрати повітря при створенні в кузові вагона нормованого надлишкового тиску.

Приведені вище результати експериментального дослідження підтверджують відповідність розроблених теоретичних положень. Порівняння істинного коефіцієнту теплопередачі  $\bar{K}$ , отриманого на стадії проектування, і розрахова-

ного  $\bar{K}$  за результатами експериментальних досліджень збігається з похибкою у 5,6 %. Це дає підставу стверджувати, що теплотехнічні якості кузова, заплановані розробниками на стадії проектування, в повній мірі реалізовані виробниками на стадії виробництва.

Новий вагон досліджують найбільш точним методом рівноважного теплового режиму, який достатньо надійно визначає приведений коефіцієнт теплопередачі огороження кузова.

Навіть при наявності величини приведенного коефіцієнта теплопередачі доцільно мати незалежну оцінку герметичності вагона. Герметичність вагона оцінюється за витратами об'єму повітря при підтриманні всередині вагона надлишкового тиску величиною 49 Па.

Значно більше складним є питання визначення теплотехнічного показника за теплотехнічним показником КВТ після проходження капітального ремонту. Це пов'язано з необхідністю перевірки кожного вагона. Контроль якості капітального ремонту КВТ повинен передбачати мінімальну кількість регламентованих випробувань вагонів, що не порушують технологічного ремонту та суттєво не затримують випуск відремонтованих вагонів. Вважається доцільно виконувати на вагоноремонтних підприємствах два експериментальних теплотехнічних дослідження вагонів:

- 1) прискореним методом визначити коефіцієнт теплопередачі кузова вагона;
- 2) методом створення надлишкового нормованого тиску повітря в кузові вагона визначити показник герметичності.

Важливим методичним етапом подальшого дослідження є визначення значення водяного еквіваленту теплоізоляційного огороження кузова вагона ( $W$ ). Це дає можливість створення метода нестационарних режимів більш зручного та продуктивного з визначення коефіцієнта теплопередачі кузова вагона. Значення  $W$  можливо визначати шляхом проведення спеціальних експериментів, при цьому повинні бути обов'язково відомі значення коефіцієнта теплопередачі кузова. Найбільш зручним та надійним для досягнення цієї мети є метод швидкого підігріву повітря у вагоні з наступним природнім його охолодженням.

Ступень обмеження експлуатаційної здатності відремонтованого вагона пропонується характеризувати на підставі побудови та аналізу графічних залежностей зміни температури вантажу від перепаду температур атмосферного повітря на умови транспортування з урахуванням експериментального визначення теплотехнічних показників огороження кузова вагона, перепаду температур навколишнього середовища та теплового еквіваленту вантажу.

Для побудови цих графічних залежностей можливо використовувати систему балансових рівнянь (7) теплотехнічного стану вагона з вантажем та побудови відповідних графіків.

Розглянуті основні принципи та методичні основи паспортизації КВТ не є загальноприйнятими. Більш того, для їх реалізації потрібні значні зусилля робітників науково-дослідних організацій та вагонобудівних і вагоноремонтних підприємств.

Однак є підстави вважати, що удосконалення методів експериментального визначення параметрів теплотехнічного стану КВТ та впровадження теплотехнічної паспортизації буде сприяти суттєвому підвищенню ефективності використання вагонів в умовах експлуатації.

## 8. Висновки

1. Аналіз показників експлуатаційної роботи ізотермічного рухомого складу дає підстави стверджувати, що в сучасних умовах значно змінюються обсяги, номенклатура та умови перевезення вантажів. Зростають обсяги та номенклатура вантажів, що при перевезенні потребують лише захисту від атмосферних опадів та різких перепадів температур. Для перевезення цих вантажів перевагу мають критичні вагони з теплоізоляцією, які здатні забезпечити необхідний захист та умови зберігання при транспортуванні. Відповідно існуючого стану перевезення вантажів, парк ізотермічного рухомого складу в теперішній час достатньо структурований та удосконалюється підходи для забезпечення ефективного функціонування ізотермічних вагонів.

2. Для роздільного визначення показників тепло-масообміну, істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$ , використовуються експериментальні умови теплового процесу нагрівання повітря у вантажному приміщенні кузова вагона і вимірювання об'єму витрати повітря крізь нещільності при створенні в кузові постійного стандартного надлишкового тиску 49 Па. На умови нормативних документів теплотехнічних випробувань розроблена математична модель та процедура з роздільного визначення показників тепло-масообміну істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$  і площі еквівалентного отвору фільтрації  $F_{ek}$  теплоізовованого огороження кузова вагона.

3. При експериментальній перевірці розроблених теоретичних положень і математичної моделі з використанням теплотехнічних випробувань критичного вагона з теплоізоляцією моделі 11-1807-04 значення істинного коефіцієнта теплопередачі  $\bar{K}$ , встановленого при проектуванні вагона і отриманого експериментальними дослідженнями, результати збігаються з похибкою 5,6 %. Це дає підставу стверджувати про достатню достовірність розробленої математичної моделі та процедури роздільного визначення показників тепло-масообміну в реальному тепловому процесі.

## Література

1. Osmak, V. (2015). The railway isothermal rolling equipment classification considering the main body enclosure thermotechnical properties criteria. *Metalurgical and Mining Industry*, 3, 265–267. URL: [http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2015\\_3/035%20Osmak.pdf](http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_3/035%20Osmak.pdf)
2. Shi, S., Gao, H. X., Li, M., Liu, B. (2013). Calculation of Coach Body Heat Transfer Coefficient for the High-Speed Railway Train in China. *Advanced Materials Research*, 805-806, 562–569. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.805-806.562>
3. Hodás, S., Pultzerová, A. (2017). Modelling of Railway Track Temperature Regime with Real Heat-Technical Values for Different Climatic Characteristics. *Civil and Environmental Engineering*, 13 (2), 134–142. doi: <https://doi.org/10.1515/cee-2017-0018>
4. Faramarzi, R., Navaz, H. K., Kamensk, K. (2018). Transient Air Infiltration/Exfiltration in Walk-In Coolers. *ASHRAE JOURNAL*, 60 (3). URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1435907>

5. Celik, M., Paulussen, G., van Erp, D., de Jong, W., Boe, B. (2018). Transient Modelling of Rotating and Stationary Cylindrical Heat Pipes: An Engineering Model. *Energies*, 11 (12), 3458. doi: <https://doi.org/10.3390/en1123458>
6. Chugunov, M., Osyka, V., Kudaev, S., Kuzmichyov, N., & Klyomin, V. (2014). Analysis and Design of Rolling Stock Elements. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 14 (09). doi: <https://doi.org/10.7463/0914.0726307>
7. Gonçalves, J. C., Costa, J. J., Lopes, A. M. G. (2019). Analysis of the air infiltration through the doorway of a refrigerated room using different approaches. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113927. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113927>
8. Fomin, O. V. (2015). Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 68–76.
9. Kelrykh, M., Fomin, O. (2014). Perspective directions of planning carrying systems of gondolas. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 64–67.
10. Açikkalp, E. (2013). Models for optimum thermo-ecological criteria of actual thermal cycles. *Thermal Science*, 17 (3), 915–930. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci110918095a>
11. Moradi, A., Rafiee, R. (2013). Analytical solution to convection-radiation of a continuously moving fin with temperature-dependent thermal conductivity. *Thermal Science*, 17 (4), 1049–1060. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci110425005m>
12. Milosevic, M., Stamenkovic, D., Milojevic, A., Tomic, M. (2012). Modeling thermal effects in braking systems of railway vehicles. *Thermal Science*, 16, 515–526. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci120503188m>
13. Бартош, Е. Т., Иванов, К. В. (1972). Метод неравновесных режимов для оценки инфильтрации кузова вагона. *Труды ВНИИЖТа*, 456, 100–109.
14. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskiy, I., Khozia, P., Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 63–71. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Nikulshin, V., Bailey, M., Nikulshina, V. (2006). Thermodynamic analysis of air refrigerator on exergy graph. *Thermal Science*, 10 (1), 99–110. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci0601099n>
16. Budiyo, M. A., Shinoda, T. (2017). Stack Effect on Power Consumption of Refrigerated Containers in Storage Yards. *International Journal of Technology*, 8 (7), 1182. doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i7.771>
17. Bubnov, V. M., Myamlin, S. V., Hurzhy, N. L. (2009). The Improvement of the rolling stock design for containers transportation. *Nauka ta Progres Transportu*, 26, 11–14.
18. Ting, H.-H., Hou, S.-S. (2016). Numerical Study of Laminar Flow and Convective Heat Transfer Utilizing Nanofluids in Equilateral Triangular Ducts with Constant Heat Flux. *Materials*, 9 (7), 576. doi: <https://doi.org/10.3390/ma9070576>